利用三维激光扫描技术动态监测沟蚀发育过程的方法研究

张 姣[1,2]，郑粉莉[1,2]，温磊磊[1,2]，俞方圆[1,2]，安 娟[2,3]，李桂芳[2,3]

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院，陕西 杨陵 712100；2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室，陕西 杨陵 712100；3. 中国科学院 研究生院，北京 100049)

摘 要：在介绍三维激光扫描技术基本原理的基础上，详述了应用三维激光扫描技术实现沟蚀发育过程动态监测的方法和流程，包括扫描测量前期准备、扫描测量、点云预处理、坐标转换、TIN 及等高线的生成、侵蚀量的估算等。以沟蚀发育过程的模拟降雨试验为案例，介绍了应用三维激光扫描技术进行沟蚀发育过程动态监测的方法，包括实地数据采集、点云分析处理和建模等，并分析了本案例基于三维激光扫描技术估算侵蚀量的精度，其平均精度达到 96.85%。建议在野外应用三维激光扫描技术动态监测沟蚀过程时结合 GPS 进行辅助测量。

关键词：监测方法；三维激光扫描技术；沟蚀

文献标识码：B **文章编号**：1000-288X(2011)06-0089-06 **中图分类号**：S152，P204

Methodology of Dynamic Monitoring Gully Erosion Process Using 3D Laser Scanning Technology

ZHANG Jiao[1,2], ZHENG Fen-li[1,2], WEN Lei-lei[1,2], YU Fang-yuan[1,2], AN Juan[2,3], LI Gui-fang[2,3]

(1. *College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*; 2. *State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*; 3. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)

Abstract: This paper introduced the basic principles of laser scanning technology (LIDAR), and specified the method of application the LIDAR to dynamically monitor gully erosion processes, which included measuring preparation, scanning survey process, point cloud pre-processing, coordinate transformation, TINs generation and soil loss estimation. Taking the experimental study on the gully erosion processes by simulating rainfall as a study case, dynamic monitoring method of gully erosion process using LIDAR was described in detail, which comprised field data collection, point cloud analysis, and mesh modeling. Comparison of the measured soil loss and the estimated soil loss showed that LIDAR technology has high accuracy to monitor soil erosion, and the estimating accuracy reaches to 96.85%. It suggests that the LIDAR should be combined with GPS technology to monitor gully erosion in field experiment.

Keywords: monitoring method; LIDAR; gully erosion

沟蚀是一种常见的土壤侵蚀方式，在土壤侵蚀中占据重要地位。在我国黄土高原，沟蚀引起的侵蚀产沙量占流域总产沙量的 50%～70%[1]。沟蚀不仅会加剧水土流失，而且影响农业生产和人居环境。因此，沟蚀的定量研究对土壤侵蚀研究具有重要的意义。沟蚀监测最早是在黄土高原开展的，以野外调查为主，主要的监测方法有插钎法[2]、填土法[3]、测尺法[4]、地形测针仪(测针板)[5]法等。这些方法尽管在数据采集和分析处理方面易于掌握，但受人为因素影响较大，分析结果往往与实际有较大的偏差，而且测量过程对侵蚀沟的形态造成破坏，导致测量结果的不准确性增大。1988 年徐国礼和周佩华[6]开始尝试使

收稿日期：2011-05-10 **修回日期**：2011-08-25

资助项目：国家自然科学基金项目“黄土丘陵区发育活跃期切沟侵蚀过程研究”(40871137)；国家基础研究(973)发展计划项目“不同类型区土壤侵蚀过程与机理”(2007CB407201)

作者简介：张姣(1985—)，女(汉族)，陕西省绥德县人，硕士研究生，主要从事高新技术在土壤侵蚀监测方面的研究。E-mail：zhangjiao1985@126.com。

通信作者：郑粉莉(1960—)，女(汉族)，陕西省蓝田县人，博士，研究员，博士生导师，主要从事土壤侵蚀过程及预报和侵蚀环境效应评价研究。E-mail：flzh@ms.iswc.ac.cn。

用立体摄影测量技术进行沟蚀监测，但因其测量范围小，投影变形大及受地面坡度影响等，使得此工作随后终止。随着 3S 技术的发展，高精度 GPS 技术动态监测沟蚀过程在黄土高原和东北黑土区取得了一定的进步[6-9]，但对于危险地形区人为监测难以实现；加上在地形复杂区，不能接受到足够的卫星信号，影响沟蚀的监测精度。目前，研究者[10]在室内利用人工降雨模拟试验进行沟蚀监测研究，但主要的监测手法以手工测量为主，因而精度不高，且花费时间较长。

三维激光扫描技术是 20 世纪 90 年代中期出现的一项新技术，又称“实景复制技术”[11]，与传统的单点测量方法相比，它具有高精度和高密度、三维快速测量、主动无接触等特点，使其在文物保护[12]、古建筑修复[13]、工程建筑[14]、复杂地形测绘[15]，并在水土保持等领域得到了广泛的应用。本研究尝试利用三维激光扫描技术动态监测沟蚀发育过程，以期为沟蚀监测提供新的思路和方法。

1 三维激光扫描技术原理

三维激光扫描技术是一个使用激光和相机捕获坐标和图像信息的高精度立体扫描技术[17]。整个三维激光扫描技术的测量系统主要由三维激光扫描仪，内置数码相机，后处理软件，电源以及附属设备构成，简称 LIDAR。

三维激光扫描技术的测量原理是由激光脉冲二极管发射的激光脉冲，经过旋转棱镜，射向目标，然后通过探测区，接收并记录反射回来的激光脉冲信号来捕获数据，最后经过软件后处理建模输出[18]。激光扫描的过程，实际上就是一个不断地进行数据采集和处理的过程。通过具有一定分辨率的点与激光扫描设备构成一个坐标系。通过激光扫描测量系统的测角和测距从而计算出测点的三维坐标(x,y,z)[19]（图 1）。其中 P 点为地面扫描点，O 点为测量系统原点。地面三维激光扫描测量系统通过数据采集获得距离观测值 S，精密时钟控制编码器同步实时地测量出每个激光脉冲的横向扫描角度观测值 α 和纵向扫描观测值 θ。扫描测量系统在内部坐标系内计算出 P 点的三维坐标[20]。

$$\begin{cases} x = S\cos\theta\cos\alpha \\ y = S\cos\theta\sin\alpha \\ z = S\sin\theta \end{cases}$$

2 三维激光扫描技术监测沟蚀过程的流程

三维激光扫描技术监测沟蚀过程的主要作业流程包括外业数据采集，点云预处理，数据的配准和拼接，TIN 及等高线的生成，地形特征的获取等几个步骤。以 Leica Scanstation 2 为例，介绍具体的作业流程。（1）外业数据采集。（2）Cyclone 中进行数据预处理。非地貌数据剔除，点云的补漏和拼接。（3）基础地理信息生成。包括 TIN MESH 的生成，等沟深线的生成，沟蚀量的估算等。（4）数据再次加工处理。包括其它地貌信息的提取等。

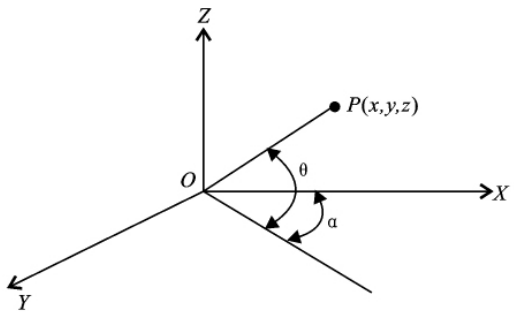


图 1 三维激光扫描技术测点三维坐标

2.1 外业数据采集

2.1.1 扫描测量前期准备 在利用 LIDAR 技术进行测量之前，需了解扫描测量系统的坐标系。扫描测量的坐标系分为相对坐标和绝对坐标。相对坐标是仪器自身的内部独立坐标系或者进行统一后的坐标系。扫描系统内部坐标原点一般定义在系统的光电中心点，Z 轴是测量系统的竖轴，即仪器旋转轴，Y 轴为仪器平面的初始位置，X 轴与前两轴垂直并成一个右手系；统一坐标系是指将各站采集的数据通过公共靶标点统一到某一个坐标系下；绝对坐标是地方或者国家坐标系。

野外测区范围比较大时，一般采用绝对坐标系。利用 LIDAR 在野外实施扫描前，需要对扫描测量区进行实地踏勘，布设控制网，事先绘制扫描测量的计划草图，显示扫描仪和靶标的所在位置以及包含每站中靶标位置的靶标信息列表。实施测量时，应首先进行控制测量，对于测区范围内有高程控制点的区域，可设置为靶标所在地；无高程控制点的区域，需事先在确定放置靶标的地方结合传统的测量仪器如 GPS、全站仪等进行点位测量，确定地理位置。

在室内结合模拟降雨试验或径流冲刷试验研究沟蚀时，由于测量面积较小，采用相对坐标即可。为了保证多期测量数据的拼接精度，需保证靶标所在位置保持不变。在扫描测量前，可在第一次放置靶标的位置用防水材料做标记，然后进行直接扫描。

2.1.2 扫描测量 扫描测量时，仪器和标靶设置的原则应既能保证整个测量区域能被覆盖到，又能使获取的原始数据量最小化和减少设站的次数。仪器的架设应遵循从高至低的原则。靶标的设置应遵循两

个原则,一是近似三角形的原理,以便能获得测量区域的整体坐标配准精度。二是靶标距离扫描仪的位置不能太远,太远会使得靶标中心的识别精度降低,建议在 50 m[21]之内。

扫描的同时可以勾画现场注释草图和记录扫描日志,以便有序地记录所有扫描和扫描中生成的靶标,这些信息也非常有助于后期的拼接和建模。测区内沟谷发育深且窄时,由于沟壁遮挡会出现"黑洞",即扫描仪扫不到的地方,可以结合传统测量仪器如 GPS 进行"黑洞"数据的补充和加密测量,同时对特殊地貌和地区进行拍照记录,以便于后期数据的处理和编辑。扫描的过程中应随时观测生成的点云,以便对数据进行实时补充。

每站扫描完后,需要对至少 3 个靶标进行扫描,为了防止后期数据处理的误差,可设置 4 个靶标,其中一个作为备用靶标。测区范围比较大时,既要对靶标进行精细扫描,还需要用 GPS 或者全站仪测出每个靶标中心的三维坐标,以便减少后续利用多站数据的配准和拼接引起的传递误差。为了防止靶标挪动和丢失,靶标测量在每一站扫描结束后立即进行。

在室内进行扫描时,需要特别注意两点,一是仪器距离测量区域应在 1.5 m 以外,二是标靶不能距离仪器太近,太近会在后期的数据拼接和处理时带来较大的坐标转换误差和拼接误差。

2.2　数据的配准和拼接

每次扫描得到的数据都是以当前测站为原点的仪器内部独立坐标系。通常情况下,为了获得测量区域的完整信息,需要从不同位置进行扫描或者后期进行特殊地形部位补扫,因此得到的数据需要通过 3 个或者 3 个以上的同名靶标作为公共控制点进行坐标的统一。这一步称为点云的"配准"或者"拼接"。进行拼接的方法有两种:一种是相对方式,即是以某一站的扫描坐标系作为基准,将其它各站的坐标系统一转换到该站的坐标系中;另外一种配准方式是绝对方式,即每站中的每个靶标的中心坐标点通过 GPS 或者全站仪进行精确地三维测量。

相对方式进行配准时需要至少 3 个同名靶标才能实现坐标的转换。这种方式不需要测量每个靶标中心点的绝对坐标,方便易行,但缺点是如果连续传递的站点比较多,则会引起较大的传递误差。因此比较适用于室内或者野外小区的点云拼接。室内应用情况下,1 mm 的采样密度,3 mm 的配准精度是可以接受的。采用绝对方式进行配准时,各测站的点云数据都统一转换到绝对坐标系中。这种方式由于不存在多站坐标传递的连续转换,因此整体精度较好,缺点是需要另外携带其它测量仪器,因此比较适用于野外较大范围的地形测量。野外测量采样密度在 1 cm 的情况下,3 mm 的拼接误差是较为理想的。

如果在扫描过程中遗漏了对标靶的精细扫描,则可以利用获得的球形点云对靶标进行拟合,或者利用测得的重叠区域内的特殊点进行拼接,但这两种方法都会引起较大的拼接误差。

2.3　点云预处理

测区范围内植被、树木或者其它干扰点的存在,会形成"噪点",在数据预处理的时候需要将非地貌数据剔除,以保证数据质量和减少原始数据量。在后续的处理软件中,对于高大树木等与地貌数据差别较大的点云可以应用过滤算法[17,20,27]进行非地貌数据的自动识别和剔除,对于草地等植被则尽可能通过手工方式进行剔除。

2.4　坐标的转换

采用相对方式进行点云拼接后的坐标系还是测量系统本身的坐标系,且在室内或者小区应用的时候都有一定的坡度,因此需要将系统坐标通过寻找与地面平行的点进行坐标转换生成用户自定义的水平坐标系。如果采用绝对方式进行拼接,则使用靶标拼接相邻站点的点云,并使用已知大地坐标系的靶标点将所有点云纳入统一的真实大地坐标系下。

2.5　TIN 及等高线的生成

进行坐标转换后,可以在激光扫描仪的后处理软件中,如 Leica 的 Cyclone 软件中对点云数据进行编辑和处理,应用各种处理方法对非地貌数据进行剔除后,可以直接在其中进行 DEM 和等高线的生成,利用软件自身强大的 3D 渲染功能,对点云数据自动生成 TIN MESH,软件中的 TIN MESH 与 ArcGIS 中的 TIN 生成原理非常类似,均是由不规则三角网生成的。与 ArcGIS 区别比较明显的是,Cyclone 在进行三维显示和渲染的时候,速度快且色彩艳丽。虽然其本身生成的 TIN MESH 实际上就是 TIN,但是点云数据只能通过抽稀后以.txt 和.dxf 格式导入 ArcGIS 中应用。

2.6　侵蚀量的估算

利用两次扫描的结果生成的 TIN MESH 相减就可以进行体积差的计算,在测得土壤容重的情况下,可估算侵蚀量。由于采样密度大,采样精确,利用此种方法进行侵蚀量估算的精度非常高。

2.7　与 ArcGIS 等软件结合进行其它信息的提取和图件的生成

由于利用三维激光扫描技术采集数据时采样密度较大,相对于 ArcGIS 等地理信息系统应用时数据

量太大，且在 ArcGIS 中构建三角网和生成等高线时，细节信息过多，使得生成的 TIN 或者等高线紊乱，花费的时间也很长。所以一般将经过处理的点云数据按照应用要求抽稀后再导入相关地信软件进行计算。在 ArcGIS 等软件中生成 DEM，可进行各种地貌信息的提取。

3 实例分析

3.1 数据采集与作业流程

本试验研究在水土保持研究所的模拟降雨大厅进行。试验土槽尺寸 3 m(宽)×8 m(长)×0.6 m(深)，试验用土为安塞县黄绵土，上层(耕层)土壤容重为 1.10 g/cm^3，下层(犁底层)土壤容重为 1.25 g/cm^3。

试验土槽一次装土约 9.5 t。利用人工降雨试验模拟沟蚀发育过程，每次降雨后采用三维激光扫描仪(Leica Scanstation 2)进行数据采集，采用 Cyclone 6.0 进行点云数据的编辑和处理，并进行 TIN 的生成和侵蚀量的估算。

具体作业流程包括：(1) 划定测量区域，并测定测量区域的土壤容重。图 2 为本次试验的扫描区域，采用 Leica Scanstaion 2(点位精度±6 mm@50 m，距离精度±4 mm@50 m)对研究区域进行扫描。根据测区的范围和沟蚀的发育情况，每次设站 1～2 站，每站扫描设 4 个靶标，其中一个为备用靶标，每次扫描时采用自行研制的仪器将扫描仪进行升高，以便能更好地采集到沟壁以及沟底的数据。仪器距离试验土槽 2～3 m，采样密度 1 mm，采样时长 20～40 min，每次采集样点约 130 000 个。因测量区域较小，因此直接进行扫描，扫描完成后对靶标进行精细扫描，并记录靶标顺序和编号，同时用防水记号笔做好每个靶标的标记，使每次扫描的靶标均处在同样的位置，得到的原始点云如图 3 所示。(2) 非地貌数据剔除和点云数据补洞。即剔除各站扫描得到的原始点云中土槽四周的非地貌数据(钢板、栏杆等)和对未测量到的区域进行点云补洞等操作。(3) 点云拼接。利用获得的 4 个公共靶标在扫描仪配套的 Cyclone 软件中进行点云拼接，拼接精度为 1 mm，拼接后得到完整点云数据(图 4)。(4) 定义水平坐标系。因试验区域具有一定的坡度，因此在 Cyclone 6.0 中利用与试验土槽 8 m 方向平行的靶标 S_1 和 S_2 的中心点进行水平坐标系定义，并将土槽底部左下角第一个点作为坐标原点。(5) 生成 TIN MESH。利用处理后的点云在 Cyclone 6.0 中进行 TIN MESH(图 5)的生成。(6) 提取等沟深线。在生成的 TIN MESH 上进行等沟深线的提取(图 6)。(7) 沟蚀发育过程分析。对连续降雨后的坡面进行扫描，生成沟蚀发育不同阶段的 TIN MESH，对生成的 TIN MESH 进行对比研究，分析各阶段的沟蚀时空分布规律和侵蚀方式演变。(8) 沟蚀体积计算。在 Cyclone 中应用 TIN VOLUMN 模块，用本次降雨后生成的 TIN MESH(图 5)减去前一场降雨后生成的 TIN MESH(图 7)，即可获取沟蚀的体积。(9) 侵蚀量计算。基于实测土壤容重和提取的沟蚀体积，估算沟蚀量。

3.2 监测精度分析

本研究案例中在降雨强度 100 mm/h，坡度 20°，坡宽 3 m 的条件下进行了 4 场连续降雨。基于实测的三维激光扫描数据，生成各场次降雨的 TIN MESH，然后对相邻降雨场次的 TIN MESH 进行差分运算(用后一场降雨生成的 TIN MESH 减去前一场降雨生成的 TIN MESH)获得侵蚀体积，最后，基于实测土壤容重进行侵蚀量估算。各场次降雨的实测侵蚀量与估算侵蚀量详见表 1。

表 1 每场降雨后的实测侵蚀量与估算侵蚀量对比

降雨场次	体积差值/m^3	估算侵蚀量/kg	实际侵蚀量/kg	误差/%
第 1 场降雨	0.094	117.43	112.84	4.07
第 2 场降雨	0.302	377.78	359.57	5.06
第 3 场降雨	0.764	954.50	932.29	2.38
第 4 场降雨	0.924	1 155.53	1 143.19	1.08
平均值				3.15

由表 1 可以看出，实测值与估算值的误差小于 6%，平均误差为 3.15%，且随降雨场次增加，估算值与实测值的误差呈减小趋势。仅第 2 场降雨的误差最大，为 5.06 %，这是由于第 2 场降雨过程中以沟头下切侵蚀和溯源侵蚀为主，沟壁的发育并不显著，造成沟深且窄，扫描仪因受沟壁遮挡而无法获取部分沟底和沟壁数据，因而估算精度略有降低。第 4 场降雨后沟蚀的充分发育使得沟壁开阔，估算精度最好，误差仅为 1.08 %。

同时，由表 1 可知基于三维激光扫描技术估算的侵蚀量皆大于实测值。造成这种现象的主要原因是 TIN MESH 运算均以第一次降雨前的坡面作为参照面(reference plane)，但实际降雨过程中坡面会出现轻微沉降，造成实际参照面较计算参照面略低，从而使得估算侵蚀量增大。由此说明，利用 LIDAR 进行沟蚀监测具有很好的精度。

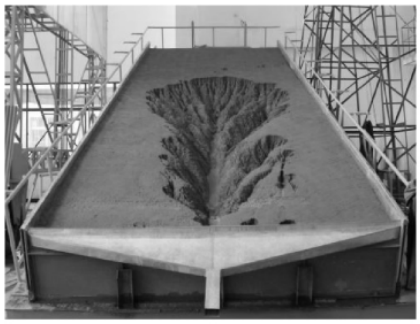


图 2　试验坡面测区照片

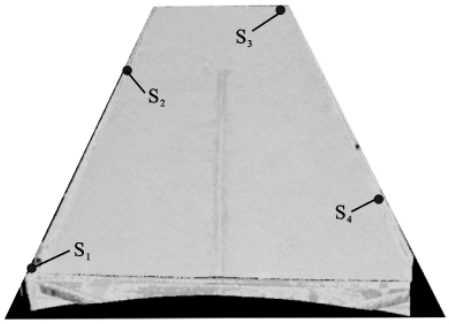


图 3　试验坡面原始点云

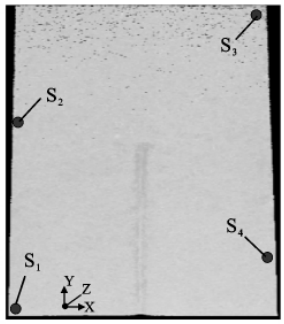


图 4　试验坡面预处理后的点云

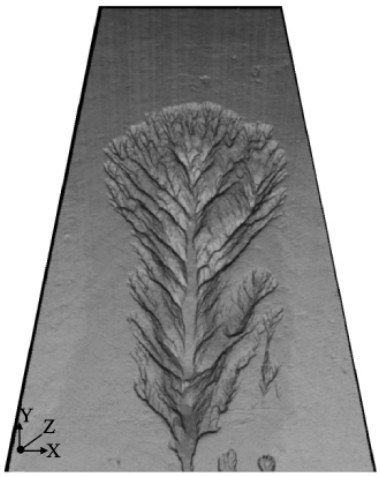


图 5　试验坡面次降雨后生成的 TIN MESH

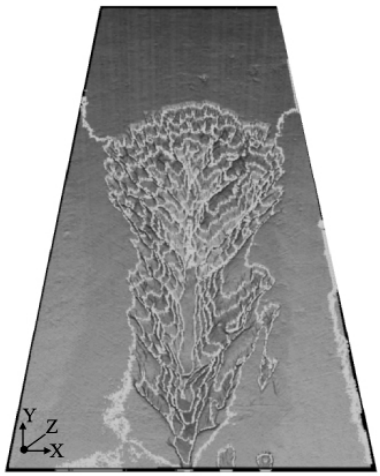


图 6　试验坡面等高线提取

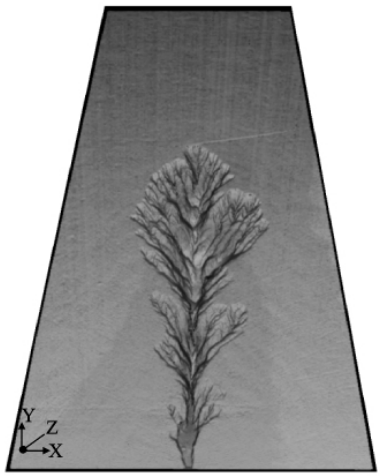


图 7　试验坡面前一场降雨后生成的 TIN MESH

4　结 论

本研究详述了利用三维激光扫描技术进行沟蚀动态监测的流程,并以室内沟蚀发育过程模拟试验为案例,应用 Leica Scanstation 2 三维激光扫描技术进行实地数据采集,基于 Cylone 6.0 对测量数据进行分析,并作为建模工具对点云进行 TIN MESH 的建立和等沟深线的提取,进行侵蚀量的估算。在 4 场模拟降雨试验中,估算侵蚀量与实测侵蚀量之间的平均误差为 3.15 %,说明应用三维激光扫描技术能使沟蚀的监测变得快速、精确、并能真实细致地反映地表形态;同时也弥补了野外利用其它方法进行测量时特殊及危险地形难以监测的不足。

全数字化的操作流程也使得其在数据的分析处理时较为快速和方便。但由于利用三维激光扫描技术进行沟蚀的动态监测尚处在探索阶段,结合本试验研究,提出一些建议。

(1) 扫描系统本身不具备定义绝对坐标的功能,因此在进行沟蚀动态监测时对于较大范围的地貌数据获取的时候,建议交互使用其它测量仪器,如 GPS 和全站仪等作为辅助,获取靶标的实地三维坐标信息。

(2) 地形起伏比较大或者沟壁窄而深的情况下,容易造成数据的"黑洞",使得估算的沟蚀量变小。除了采用多站测量和局部数据补扫的方法外,还可以使用传统测量仪器如 GPS 对"黑洞"数据进行补充或者结合近景摄影测量来保证测区数据的完整。

(3) 不能自动化或者半自动化剔除非地貌数据的点云信息。因此只能应用于地面植被覆盖度不是很高的地方。而且对于后期处理中剔除非地貌数据后的点云容易造成数据缺失,影响后期 DEM 的生成等。

(4) 受限于仪器本身的有效扫描距离和范围,以及进行多站测量时,靶标距离太远则不能被识别,设站太多会使得工作量太大,获取的数据量太大也不利用数据的后处理。因此,比较适用于小范围的测量。如果流域范围较大的话,则需要与机载扫描结合。

致谢:本文在数据处理过程中得到了徕卡测量系统贸易(北京)有限公司技术工程师段奇三老师和北京则泰盛业科技发展有限公司技术工程师薛勇老师的大力支持,谨此致谢!

[参 考 文 献]

[1] 郑粉莉,江忠善,高学田. 水蚀过程与预报模型[M]. 北京:科技出版社,2008:8-9.

[2] 李晓莉,申向东,张雅静. 内蒙古阴山北部四子王旗土壤风蚀量的测试分析[J]. 干旱区地理,2006,29(2):292-295.

[3] 郑粉莉,高学田. 黄土坡面土壤侵蚀过程与模拟[M]. 西安:陕西人民出版社,2000:62-65.

[4] 郑粉莉. 细沟侵蚀量测算方法的探讨[J]. 水土保持通报,1989,9(4):41-45.

[5] 丁文峰,张平仓,李勉. 地形测针板在坡面土壤侵蚀研究中的应用[J]. 中国水土保持,2006(1):49-51.

[6] 徐国礼,周佩华. 地面立体摄影测量在监测沟蚀中的运用[J]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊,1988(1):97-102.

[7] 张鹏,郑粉莉,王彬,等. 高精度 GPS,三维激光扫描和测针板三种测量技术监测沟蚀过程的对比研究[J]. 水土保持通报,2008,28(5):176-181.

[8] 胡刚,伍永秋,刘宝元,等. 东北漫岗黑土区浅沟侵蚀发育特征[J]. 地理科学,2009,29(4):545-549.

[9] 张鹏,郑粉莉,陈吉强,等. 利用高精度 GPS 动态监测沟蚀发育过程[J]. 热带地理,2009,29(4):368-373.

[10] Gong J G, Jia Y W. An experimental study on dynamic processes of ephemeral gully erosion in loess landscapes [J]. Geomorphology, 2011,125(1):203-213.

[11] 范海英,杨伦,刑志辉,等. Cyra 三维激光扫描系统的工程应用研究[J]. 矿产测量,2004(3):16-18.

[12] 臧春雨. 三维激光扫描技术在文保研究中的应用[J]. 建筑学报,2006(12):54-56.

[13] 王莫. 三维激光扫描技术在故宫古建修缮工程中的应用研究[J]. 世界建筑,2010(9):146-147.

[14] 李兆堃,严勇. 三维激光扫描在工程测量中的应用研究[J]. 苏州科技学院学报:工程技术版,2010,22(1):48-52.

[15] 夏国芳,王晏民. 三维激光扫描技术在隧道横纵断面测量中的应用研究[J]. 北京建筑工程学院学报,2010,26(3):21-24.

[16] 于泳,王一峰. 浅谈基于 GIS 的三维激光扫描仪在水土保持方案编制中应用的可行性[J]. 亚热带水土保持,2007,19(2):53-55.

[17] 马玉凤,严平,时云莹. 三维激光扫描仪在土壤侵蚀监测中的应用:以青海省共和盆地威连滩冲沟监测为例[J]. 水土保持学报,2010,30(2):177-179.

[18] Lichun S. Processing of laser scanner data and extraction of structure lines using methods of the image processing[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2004,33(1):63-70.

[19] 史友峰,高西峰. 三维激光扫描系统在地形测量中的应用[J]. 山西建筑, 2007,33(12):347-348.

[20] 毛方儒. 三维激光扫描测量技术[J]. 宇航计测技术,2005,25(2):1-6.

[21] 梁欣廉,张继贤,李海涛. 一种应用于城市区域的自适应形态学滤波方法[J]. 遥感学报,2007,11(2):276-281.

(上接第 88 页)

4 结 语

在当前网络环境下,土地利用数据共享非常重要,而现有共享方式不能满足空间数据的实时共享。GML 语言描述和定义空间对象是实现 GIS 空间数据互操作主要途径之一。本研究采用 GML 来定义和描述土地利用数据,基于 DOM,XPath 解析技术和 C# 语言开发了土地利用数据的查询系统,实现了 GML 土地利用数据浏览、查询和发布,验证了基于 GML 规范的 GIS 空间数据描述的可行性,为土地利用数据的 Web 应用提供了支持。

[参 考 文 献]

[1] 张山山, 姚封. 第二次土地调查县级土地利用数据库建立:以怀仁县为例[J]. 测绘与空间地理信息,2010,33(3):11-13.

[2] 姚封,张山山,刘玲玲. 应用 GIS 技术建立土地利用数据库的方法[J]. 地理空间信息,2010,8(3):76-79.

[3] 龚健雅,杜道生,高文秀,等. 地理信息共享技术与标准[M]. 北京:科学出版社,2009.

[4] 张书亮,阎国年,苗立志,等. GML 在中国的研究进展[J]. 地球信息科学,2008,10(6):763-769.

[5] 童小华,许谷声. 基于 GML 的 GIS 空间要素描述与应用研究[J]. 同济大学学报:自然科学版,2004,32(6):749-754.

[6] 罗显刚,谢忠,吴亮,等. 基于 GML 的 WFS 研究与实现[J]. 中国地质大学学报:地球科学,2006,31(5),639-644.

[7] 唐庆娟,陈天滋. 基于 XQuery 的 GML 查询机制的研究[J]. 计算机工程与设计,2008,29(16),4319-4322.

[8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. (GB/T—23708)地理信息—地理标记语言(GML)[S]. 北京:中国标准出版社,2009.

[9] Open Geospatial Consortium, Inc.. OpenGIS Geography Markup Language (GML) Encoding Standard 3.2.1 [EB/OL]. (2006-06-16)[2007-07-23]. http://www.opengeospatial.org/standards/GML.